

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ С НИЗКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

А.Н. Беседина, Г.Г. Кочарян, Д.В. Павлов, С.П. Соловьев

Проведено лабораторное исследование электромагнитных эффектов в горных породах с низкой пористостью при воздействии акустических волн на примере следующих материалов: тиосульфата натрия, мрамора, гранита. Исследуется вопрос о связи электрического и акустического сигналов.

Введение

Сейсмические волны, распространяющиеся в земной коре, а также динамическое деформирование и разрушение твердых тел приводят к появлению ряда электромагнитных эффектов. Для определения особенностей электромагнитных полей, образующихся при крупномасштабных тектонических явлениях, к которым относятся землетрясения, извержения вулканов, глубинные подземные взрывы большой мощности, следует изучить микроскопические процессы, лежащие в основе указанных эффектов.

Сейсмоэлектрические явления, обусловленные сейсмическими волнами и сейсмической активностью, исследуются в лабораторных и в полевых условиях уже более пятидесяти лет. Механическая энергия, высвобождающаяся в массивах горных пород, преобразуется в электромагнитную энергию за счет различных механо-электромагнитных преобразователей, таких как электрокинетический, индукционный, пьезомагнитный, классический и неклассический пьезоэлектрический эффекты (например, эффект Степанова) [Gershenzon, Vambakidis, 2001]. Часто в качестве механо-электрических преобразователей рассматривают и другие эффекты: трибоэлектрический эффект, электризацию при разрыве контактов, диффузию ионов, эффект возбуждения колебаний заряженных краевых дислокаций, а в работе [Freund F., 2002] положительно заряженные дефекты (дырки) представлены как альтернативный источник носителя электрического заряда. Каждый из этих эффектов объясняет один из аспектов возникновения сейсмоэлектромагнитных сигналов при определенных условиях, но нет единого механизма, который мог бы успешно объединить все аспекты в согласованную физическую модель. Одним из актуальных вопросов является изучение связи формы и амплитуды сейсмического импульса и электрического сигнала. Рассмотрение электрокинетического механизма возникновения электрического сигнала показало, что электрическое поле пропорционально скорости деформации частиц твердой фазы [Garambois and Dietrichz, 2001]. При диффузии ионов электрическое поле пропорционально амплитуде волны напряжений [Теркот Д., Шуберт Дж., 1985], а дислокационному механизму соответствует степенная зависимость электрического поля от напряжения. В то же время направленный поток дислокаций в металлах демонстрирует пропорциональную зависимость разности потенциалов, возникающую на гранях образца, от скорости деформации среды [Кравченко В. Я., 1967].

Хаджиконтис и Мавомато [V. Hadjicontis, C. Mawomatou, 1994] в своей работе рассмотрели нагружение опытных образцов под прессом. Их эксперименты пока-

зали, что изменение нагрузки образца может привести к поляризации горного образца, которую авторы объясняют с помощью теории дефектов (дислокаций). При нестационарном нагружении опытных образцов горного массива регистрировались электрические сигналы перед разрушением материала. Авторы показывают, что форма электрических сигналов определяется первой производной приложенного напряжения.

Таким образом, механизм возникновения электрического поля не является до конца изученным, особенно для сухих пород. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию закономерностей сейсмoeлектрического сигнала в горных породах с низкой пористостью, в том числе не содержащих флюидов в явном виде, от механического воздействия.

Постановка экспериментов

Лабораторное исследование электрического сигнала при распространении продольной волны сжатия проводилось на одномерной установке (рис. 1), которая представляла собой составной стержень, поперечные размеры которого гораздо меньше, чем его длина. Для проведения экспериментов использовались материалы с различными физико-механическими свойствами: модельный материал –

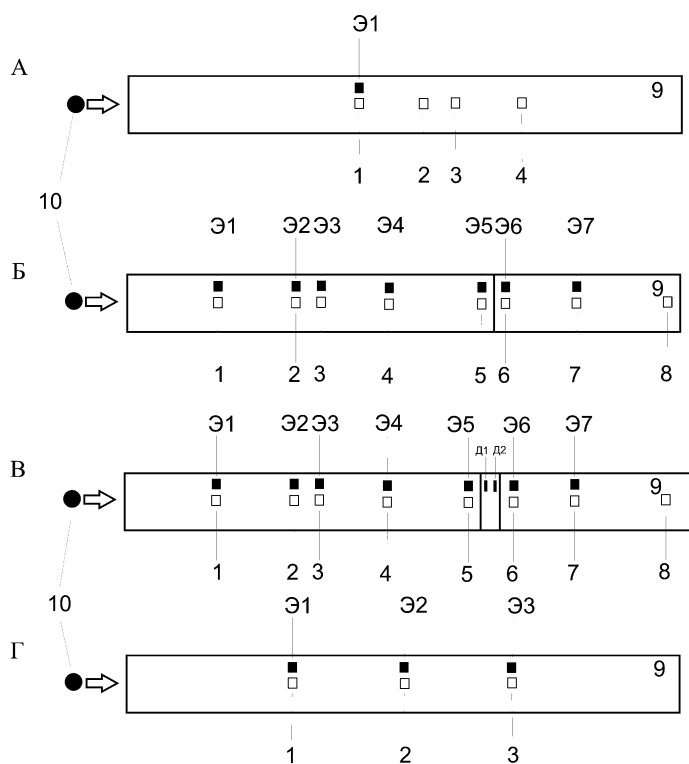


Рис. 1. Схема модельной установки: положение датчиков на гипосульфитном образце (А); на мраморном образце (Б); на мраморном образце с широкой вставкой (В); на гранитном образце (Г); Э1-Э7 – электроды; Д1-Д2 – дополнительные электроды на вставке; 1-8 – датчики ускорения; 9 – стержень; 10 – ударник

гипосульфит с гранитной крошкой, мрамор и гранит. Разработанная лабораторная установка позволяет проводить эксперименты в широком диапазоне амплитуд и частот. При этом может моделироваться как сплошная среда, так и массив, содержащий трещины.

В экспериментах с модельным материалом одномерная модель представляла собой стержень квадратного сечения ($80 \times 80 \text{ мм}^2$), длиной 4,85 м, отлитый из расплава тиосульфата натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) с гранитной крошкой. Физико-химические характеристики этого материала близки к аналогичным параметрам типичной скальной породы: $\rho = 2,31 \text{ г/см}^3$, $c_p = 4,3 \text{ км/с}$, $c_s = 2,2 \text{ км/с}$, предел прочности на одноосное сжатие $\sigma^* = 33 \text{ МПа}$. Материал обладает высокой добротностью – логарифмический декремент затухания составил по результатам измерений $\delta \approx 0,05$.

При исследовании сейсмoeлектрического сигнала в мраморе был использован брус прямоугольного сечения с размерами 80 мм на 100 мм и длиной 3,6 м. Физико-механические свойства мрамора следующие: $\rho = 3,17 \text{ г/см}^3$, $c_p \approx 6,15 \text{ км/с}$. На рис. 2 приведена фотография экспериментальной установки со стержнем из мрамора. Для моделирования нарушения сплошности в стержень на расстоянии 2,41 м от ударного торца устанавливались вставки разных размеров ($10 \times 8 \times 1,5 \text{ см}^3$ и $10 \times 8 \times 8 \text{ см}^3$) с пористостью 25 %, состоящие из песка и цемента в отношении 8:1.

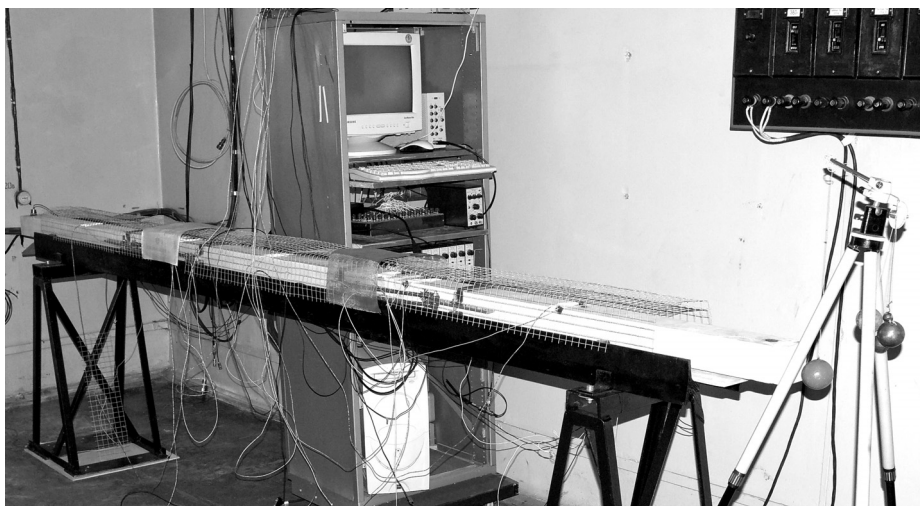


Рис. 2. Мраморный стержень с различными ударниками

Таблица 1

Минеральный состав мансуровского гранита	
Плаггиоклаз	39 %
Кварц	24 %
Мусковит	8 %
Калиевый полевой шпат	27%
Хлорит и Эпидот	2 %

Для исследования сигналов в граните использовался цельный брус прямоугольного сечения ($70 \times 100 \text{ мм}^2$) длиной 1,67 м, изготовленный из мансуровского гранита. Минеральный состав мансуровского гранита приведен в табл. 1. Его физико-механические свойства следующие: $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, пористость 2,16%, предел прочности на сжатие 127 МПа, скорость распространения продольных волн в стержне по результатам измерений составила $c_p = 4,2 \text{ км/с}$.

Продольные волны сжатия разной амплитуды возбуждались в стержне ударами шаров различного диаметра и различных плотностей о торец стержня. Для возбуждения волн сжатия большой амплитуды использовалась специально разработанная пушка [Беседина А.Н. и др., 2009]. Параметры механических колебаний регистрировались акселерометрами Briel & Kjaer типа 4344, электрический сигнал регистрировался свинцовыми электродами. Измерительные датчики закреплялись на поверхности стержня. Регистрация проводилась цифровыми осциллографами Tecktronix TDS-2014 или на плату NI PCI-6251 с выводом результатов на компьютер. Расстановка датчиков на образцах показана на рис. 1. Для гипосульфита (рис. 1а) расстояния между измерительными точками указаны в табл. 2 (точка «0» – положение ударного торца стержня).

Таблица 2

Расстояния между измерительными точками	Длина гипосульфитного стержня, см	Длина мраморного стержня без вставки, см	Длина гранитного стержня, см
0–1	250	61	50
1–2	34,3	56	33,5
2–3	3,5	10	33,5
3–4	33,4	56	–
4–5	–	53	–
5–6	–	10	–
6–7	–	56	–
7–8	–	53	–
Полная длина	485	360	167

В экспериментах с мрамором (рис. 1б, табл. 2) использовалось 8 измерительных точек, в каждой точке закреплялся датчик ускорения и электрод. Мраморный стержень состоял из трех частей, и датчики, установленные в измерительных точках 2-3 и 5-6, расположены на стыках фрагментов, составляющих стержень. При исследовании сейсмoeлектрического сигнала в мраморном образце, содержащем нарушение сплошности, на самой вставке с размерами $10 \times 8 \times 8 \text{ см}^3$ закреплялись 2 дополнительных электрода, каждый из которых располагался на расстоянии 2,5 см от краев вставки. Расположение электродов в этом случае представлено на рис. 1в. Схема установки для гранита показана на рис. 1г, а соответствующие расстояния указаны в табл. 2. Геометрические размеры гипосульфитного и мраморного стержней обеспечивают условия для формирования и распространения в стержне плоской волны. Длина переходного участка от сферического волнового фронта к плоскому составляет около 1 м. Длина стержня достаточна для обеспечения значительной задержки прихода волны, отраженной от другого конца.

Для лучшего понимания наблюдаемых явлений и для сравнительной оценки электропроводимости различных электроизолирующих материалов было проведе-

но измерение объемного удельного сопротивления образцов. В табл. 3. приведены результаты подсчетов удельного объемного сопротивления для твердых диэлектриков, где h – толщина образца, ρ_v – удельное сопротивление образца.

Таблица 3

№ п/п	Материал образца (диэлектрик)	ρ_v , Ом·м
1	Тиосульфат натрия с гранитной крошкой (серый)	$1,3 \cdot 10^9$
2	Тиосульфат натрия с гранитной крошкой (белый)	$9 \cdot 10^8$
3	Мрамор	$3 \cdot 10^{10}$
4	Гранит	10^9
5	Песок + цемент (8:1)	$5 \cdot 10^{10}$

Эксперимент показал, что среди твердых диэлектриков самое высокое удельное объемное сопротивление имеет мрамор, а самым плохим диэлектриком оказался тиосульфат натрия с гранитной крошкой. У этого материала самые низкие показатели удельного объемного сопротивления.

Экспериментальные результаты

Лабораторные эксперименты проводились сериями, в которых увеличивалась амплитуда волны напряжения в стержне. Используя разные шары для удара о торец стержня, можно получать волны разной амплитуды и разного периода. На гипосульфитном образце проводилась серия из 7 ударов, различных по амплитудам и по периодам волн сжатия. Периоды изменялись от 100 до 500 мкс, а скорости механических возмущений от 0,7 до 5 см/с. В опытах были обеспечены условия для формирования и распространения в стержне плоской волны и значительной задержки прихода волны, отраженной от другого конца, что позволило отчетливо выделить электрические сигналы, сопутствующие распространению продольной волны сжатия и выяснить степень корреляции параметров электрических и механических сигналов. Анализ полученных данных показал, что электрический сигнал, сопровождающий продольную волну сжатия, пропорционален ускорению частиц или скорости деформации.

В мраморе проводились лабораторные эксперименты как со сплошным стержнем, так и со стержнем, в котором моделировалось нарушение сплошности. Сравнение амплитуды электрического сигнала, зарегистрированного в гипосульфите и мраморе в сплошном стержне, показало, что амплитуда электрического сигнала в гипосульфите приблизительно в 30 раз больше, чем в мраморе при одинаковом ударе. После проведения предварительного анализа зарегистрированного электрического сигнала, было получено, что форма и амплитуда электрического сигнала определяются в большей степени волной деформации.

После установления в стержне нарушения сплошности поведение электрического сигнала изменилось: наблюдалось усиление электрического сигнала в измерительных точках, расположенных рядом с модельной трещиной. Для того чтобы изучить сопутствующие эффекты, которые могут быть обусловлены появлением вставки, целесообразно было рассматривать измерительные точки, находящиеся непосредственно рядом со вставкой. В дальнейшем будем рассматривать данные, зарегистрированные в точке № 5 (см. рис. 1).

На рис. 3 показаны эпюры ускорения, массовой скорости и электрического сигнала, зарегистрированные в мраморном стержне с тонкой вставкой при ударе стальным шариком диаметром 36 мм. Далее в пористую вставку накачивали 50 см³ подсоленной воды с шагом 5 см³. После этого проводилась серия из 12 ударов с изменением амплитуды и периода акустических волн. Периоды варьировались в пределах от 125 до 1200 мкс, а скорости механических возмущений – от 0,09 до 12,8 см/с.

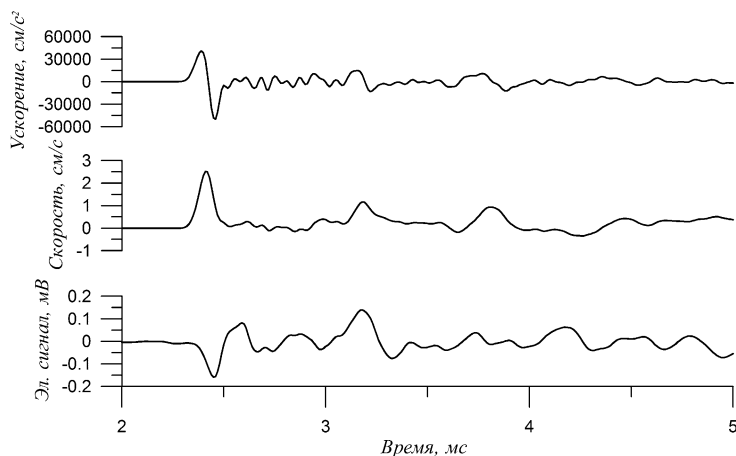


Рис. 3. Эпюры скорости, ускорения и электрического сигнала, зарегистрированные в измерительной точке 5 на стержне

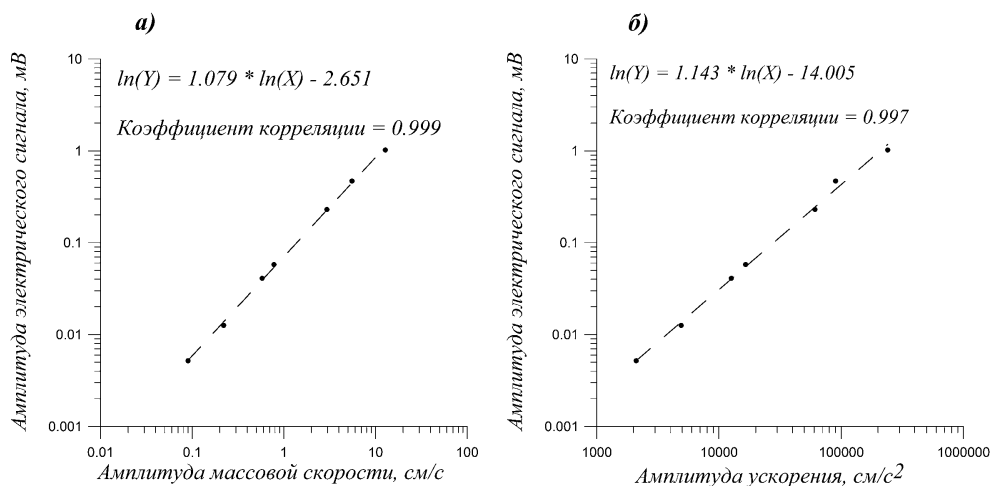


Рис. 4. Зависимость амплитуды электрического сигнала от массовой скорости (а); зависимость амплитуды электрического сигнала от ускорения (б)

Чтобы выяснить степень корреляции параметров электрических и механических сигналов, рассмотрим зависимости амплитуды электрического сигнала от скорости (рис. 4а) и ускорения (рис. 4б) частиц в продольной волне сжатия для

мраморного образца. Из сравнения этих зависимостей видно, электрический сигнал достаточно хорошо коррелирует как с ускорением, так и со скоростью. На рис. 5а приведена зависимость периода T_e электрического сигнала от периода T_m волны сжатия в логарифмическом масштабе, видно, что показатель степени $k \approx 0,91$ в аппроксимирующей зависимости вида $\lg(T_e) = \lg((T_m)^k) + b$ близок к единице. Учитывая, что зависимость периода электрической волны от периода механической волны близка к линейной, построим график зависимости амплитуды электрического сигнала от периода волны сжатия при фиксированной массовой скорости. Это позволит выяснить фактор, определяющий форму электрического сигнала. Если форма электрического сигнала определяется скоростью, то амплитуда электрического сигнала остается постоянной с увеличением периода волны сжатия. Из рис. 5б видно, что амплитуда электрического сигнала остается постоянной с периодом T_m , следовательно, амплитуда электрического сигнала пропорциональна массовой скорости частиц.

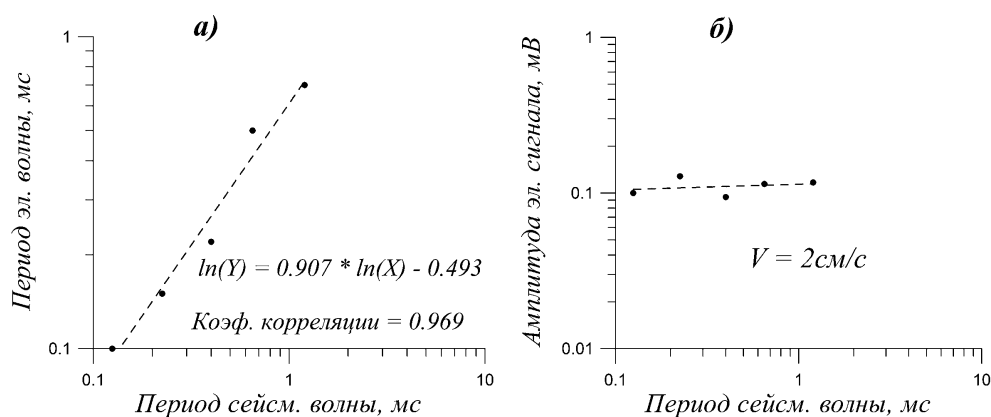


Рис. 5. Зависимость периода электрической волны от периода сейсмической волны (а); зависимость амплитуды электрического сигнала от периода сейсмической волны при постоянной массовой скорости $V \approx 2$ см/с (б)

На рис. 6 показаны электрические сигналы, зарегистрированные дополнительными электродами 1 и 2, в экспериментах с широкой пористой вставкой при ударе стальным шариком диаметром 36 мм. Электрический сигнал, зарегистрированный на вставке, возрастает практически на порядок, что говорит о лучших электропроводящих свойствах среды. Такое усиление сигнала в насыщенных пористых средах имеет электрокинетическую природу.

На гранитном стержне также проводились серии измерений с изменением амплитуды и периодов акустических волн. Периоды изменялись от 60 до 300 мкс, а скорости механических возмущений от 0,2 до 40 см/с. Волновые картины, полученные в гранитном стержне, представлены на рис. 7. Как видно из рисунка, помимо электрического сигнала, распространяющегося вместе с механической волной, также имеется электрический отклик, который возникает в момент динамического воздействия. Этот отклик наблюдается во всех экспериментах данной серии и регистрируется всеми датчиками в момент удара. Величины сейсмоэлектрического сигнала в граните и в гипосульфите сравнимы по порядку величины. Стоит отметить, что амплитуды сигналов, зарегистрированные в гипосульфите, мраморе и

граните, находятся в соответствии с результатами, полученными при измерении удельного объемного сопротивления материалов.

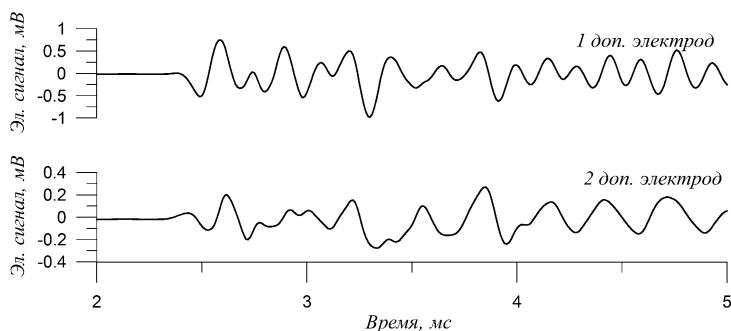


Рис. 6. Сигналы, зарегистрированные электродами, установленными на вставке в мраморном стержне в результате удара шаром диаметром 36 мм

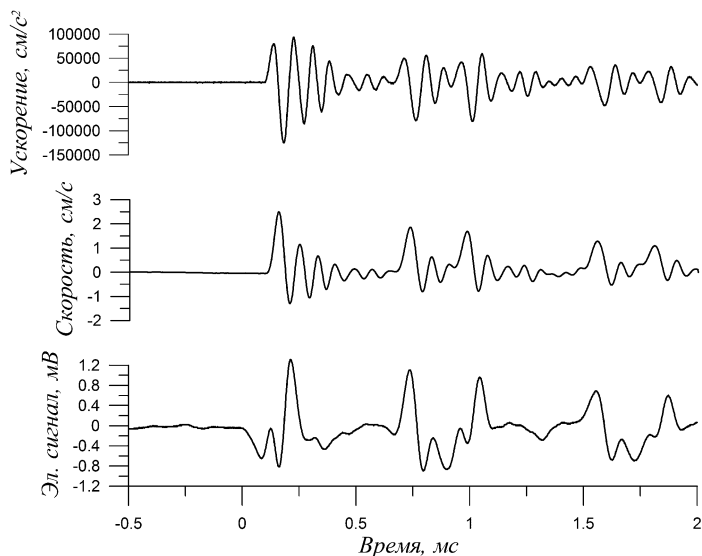


Рис. 7. Эпюры скорости, ускорения и электрического сигнала, зарегистрированные в первой измерительной точке на граните в результате удара шаром диаметром 18 мм

Закключение

Разработана модельная установка, которая позволяет исследовать сейсмoeлектрический эффект в прочных пористых материалах при распространении продольных волн сжатия с возможностью изменения периодов и амплитуд волн в широком диапазоне значений. Установлено, что в сухих скальных породах наблюдаются сейсмoeлектрические явления – возникновение электрических сигналов, амплитудно-частотные характеристики которых зависят от параметров сейсмиче-

ского импульса. В опытах с гипосульфитным стержнем электрический сигнал, сопровождающий продольную волну сжатия, пропорционален скорости деформации среды. Для мраморного стержня показано, что косейсмические вариации электрического поля определяются массовой скоростью механического возмущения, что говорит о разном механизме возникновения электрического сигнала в этих двух материалах. Показано, что в силикатных породах (например, гранит), присутствуют два вида вариаций электрического поля: косейсмический электрический сигнал и «мгновенный» электрический отклик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00614-а).

Литература

Беседина А.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Соловьев С.П. Лабораторное моделирование электромагнитных эффектов при распространении сейсмических волн. – Проблемы взаимодействующих геосфер. Сборник научных трудов ИДГ РАН. – М.: ГЕОС. 2009.

Кравченко В.Я. О возможности наблюдения движения дислокаций в проводящих кристаллах по электрическим эффектам // ФТТ. 1967. № 9, С.1050–1057.

Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 360 с.

Freund F. Charge generation and propagation in igneous rocks // J. of Geodynamics. 2002. V. 33. 543–570.

Garambois S. and Dietrichz M. Seismoelectric wave conversions in porous media: Field measurements and transfer function analysis // Geophysics. 2001. V. 66. 1417–1430.

Gershenson N., Bambakidis G. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena // Russian journal of earth sciences. 2001. 3 (4). 247–275.

Hadjicontis V., Mawomatou C. Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression // Geophysics research letters. 1994. 21 (16). 1687–1690.